

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E
ELETRÔNICA**

Isabella Garcia

**ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO PARA RTK EM VEÍCULOS AÉREOS
NÃO TRIPULADOS**

Florianópolis

2019

Isabella Garcia

**ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO PARA RTK EM VEÍCULOS AÉREOS
NÃO TRIPULADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica..

Orientador: Prof. Dr. Carlos Aurélio Faria da Rocha

Florianópolis

2019


Isabella Garcia

ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO PARA RTK EM VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

Este Trabalho foi julgada adequada para obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Eletrônica e aprovada em sua forma final pela Banca


Examinadora

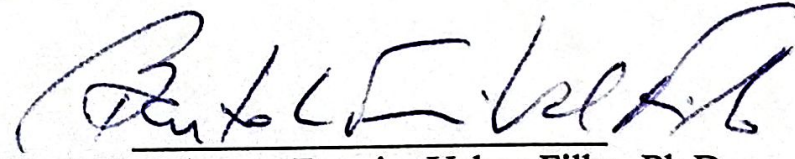
Florianópolis, 8 de fevereiro de 2019.

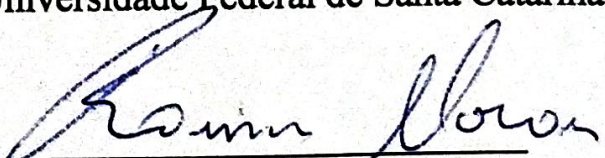

Prof. Jefferson Luiz Brum Marques, Ph.D.
Coordenador do Curso

Prof. Fernando Rangel de Sousa
Subcoordenador do Curso de Eng. Eletrônica
Port. 1659/2017/GR - CTC/UFSC

Banca Examinadora:


Prof. Carlos Aurélio Faria da Rocha, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Bartolomeu Ferreira Uchoa Filho, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Raimes Moraes, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Garcia, Isabella

Estudo comparativo de sistemas de comunicação
para RTK em veículos aéreos não tripulados /
Isabella Garcia ; orientador, Carlos Aurélio Faria
da Rocha, 2019.

76 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Eletrônica,
Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Eletrônica. 2. Sistemas de
comunicação. 3. Veículos aéreos não tripulados. 4.
GNSS. 5. RTK. I. Faria da Rocha, Carlos Aurélio.
II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Eletrônica. III. Título.

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria,
por sempre me incentivar a fazer o meu
melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que sempre me deu todo o apoio necessário, colocando minhas necessidades acima à deles. Sem este suporte, certamente este dia não seria possível.

Aos meus amigos da eletrônica pelo grupos de estudos antes das provas e pelos bares que fomos quando essas provas não saíam exatamente como esperávamos. Em especial à Gizele, minha primeira e grande amiga da eletrônica, Bruno, meu parceiro para todas as horas, Jorge e Giovanni por me ajudarem sempre que precisei. Levarei vocês para toda a vida.

Aos meus amigos fora da eletrônica Fernanda, Luísa, Carolina, Francine e Fernando. Vocês são essenciais na minha vida.

Ao meu orientador, professor Carlos Aurélio, por toda a paciência durante este trabalho.

Aos professores que tive ao longo do curso, que me ensinaram que os fracassos são, por vezes, mais importantes que os êxitos.

À todos os funcionários e sócios da empresa Novarum Sky, que me deram a oportunidade de crescer tanto pessoalmente como profissionalmente. Em especial o Juliano, que além de chefe foi também meu conselheiro profissional.

À Universidade Federal de Santa Catarina e seus servidores, pela oportunidade de ensino público, gratuito e de qualidade.

You will never truly know yourself, or the strength of your relationships, until both have been tested by adversity.

JK Rowling

RESUMO

Nos últimos anos, cada vez mais aeronaves não-tripuladas, conhecidas como drones, são utilizadas para aplicações comerciais, controlados remotamente. Sua localização é de extrema importância em aplicações de mapeamento onde a precisão exigida é centimétrica porém o posicionamento de um módulo GNSS (do inglês *Global Navigation Satellite System*) sem correção é em torno de 5m. A técnica de RTK (do inglês *Real Time Kinematics*) consiste em um algoritmo capaz de corrigir essas imprecisões utilizando dois receptores, no qual um deles é estacionário e é chamado de estação base (que fica em um ponto de coordenadas conhecidas), o outro é o *rover*, e fica junto ao drone executando a coleta de dados de posicionamento. A comunicação entre base e *rover* é possibilitada através de um *link* de rádio para que o *rover* receba os dados da estação base. Esta comunicação pode ser realizada de várias maneiras, porém deve atentar-se para o fato de que a importância do *link* entre estação base e *rover* se dá devido o RTK exigir uma latência mínima para transferir a mensagem de correção e a frequência de posicionamento do aplicativo RTK.

O trabalho tem como objetivo estudar cinco módulos de rádio e de acordo com critérios propostos determinar qual deles apresenta todas as especificações pré-determinadas. E assim realizar a coleta de dados em campo com o módulo escolhido.

Utilizou-se o módulo de rádio Ubiquiti Rocket M5 para realizar testes em campo que medissem latência, *jitter*, ruído e potência de sinal de seis pontos distintos. A latência manteve-se em 0.8 segundos, abaixo dos 2 segundos exigidos pelo RTK. O *jitter* que é a variação temporal da entrega dos pacotes de dados, mostrou-se pequeno o suficiente para não ser detectado. O ruído apresentou-se dentro do considerado aceitável em ambientes urbanos, dado que o fabricante aconselha um ruído de -91 dBm ou menos. A potência do sinal variou pouco com o aumento da distância. Com os valores de potência e ruído calculou-se a relação sinal-ruído que estavam dentro de um SNR bom para transmissão de dados, que deve variar entre 20 e 50 dB. As distâncias entre os módulos variaram entre 411 a 744 m.

O rádio usado nos testes atendeu aos requisitos propostos inicialmente, podendo ser usado também para transmissão de vídeo pelo mesmo canal. Essa transmissão torna o mapeamento mais seguro, pois se houver uma emergência o usuário pode trazer o drone em segurança. A taxa

necessária para se enviar os dados da base é de 2 kbps. Para o vídeo no momento do voo necessita-se de uma taxa de 2 Mbps e a taxa obtida no experimento foi de 4,875 Mbps, sendo possível esse uso futuramente.

Palavras-chave: GNSS. RTK. *Rover*. Estação Base. Comunicação. Latência. *Jitter*. Potência do Sinal.

ABSTRACT

In recent years, more and more unmanned aerial vehicles, known as drones, are being used for commercial, remotely controlled applications. Its location is of extreme importance in mapping applications where the precision required is centimetric however the positioning of a GNSS module without correction is around 5m. The RTK technique consists of an algorithm capable of correcting these inaccuracies using two receivers, one of which is stationary and is called the base station (which is located at a known coordinate point), the other is the rover, and is adjacent to the drone executing the positioning data collection. Communication between base and rover is made possible through a radio link so that the rover receives the data from the base station. It can be done in a number of ways so that the importance of the link between base station and rover given by RTK requires a minimum latency to transfer the correction message and the frequency of positioning of the RTK application.

The work aims to study five radio modules and according to proposed criteria determine which of them presents all predetermined specifications. And so perform the data collection in the field with the chosen module.

The Ubiquiti Rocket M5 radio module was used to perform field tests measuring latency, jitter, noise, and signal strength from six different points. The latency was maintained in 0.8 seconds, below the 2 seconds required by the RTK. The jitter which is the time variation of the delivery of the data packets has proved to be small enough not to be detected. Noise has been found to be acceptable in urban environments, as the manufacturer advises noise of -91 dBm or less. Signal power varied little with increasing distance. With the values of power and noise the signal-to-noise ratio was calculated that were within a good SNR for data transmission, which should vary between 20 and 50 dB. The distances between the modules ranged from 411 to 744 m.

The radio used in the tests met the requirements initially proposed, and can also be used for video transmission over the same channel. This transmission makes the mapping more secure, because if there is an emergency the user can bring the drone safely. The rate required to send the base data is 2 kbps. For the video at the moment of the flight a rate of 2 Mbps is needed and the rate obtained in the experiment was of 4,875 Mbps, being possible this use in the future.

Keywords: GNSS. RTK. Rover. Base Station. Communication. Latency. Jitter. Signal Strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Constelação de satélites	25
Figura 2	Segmentos do sistema GNSS.....	26
Figura 3	Cálculo do TOA.....	28
Figura 4	Trilateração	28
Figura 5	Comparação das técnicas DGNSS, SBAS, PPP e RTK em função da distância da base.....	31
Figura 6	VANT MK 6S12 Mikrokopter.....	34
Figura 7	Elementos principais do RTK.....	35
Figura 8	Elementos principais do RTK.....	36
Figura 9	RTKNAVI.....	37
Figura 10	Aeronave utilizada nos testes	38
Figura 11	<i>Printscreen</i> das informações de funcionamento.....	39
Figura 12	Interface NTRIP no RTKLIB.....	41
Figura 13	Estrutura da rede	44
Figura 14	Módulo LoRa	44
Figura 15	Módulo 3DR	45
Figura 16	Módulo XBee	46
Figura 17	Módulo ESP8266.....	47
Figura 18	Rádio UBIQUITI Rocket M5.....	48
Figura 19	Área de estudo	50
Figura 20	Foto do teste	50
Figura 21	Esquemático da comunicação entre a <i>ground station</i> e a <i>rover</i>	51
Figura 22	Interface do simulador.....	52
Figura 23	Configuração do simulador.....	53
Figura 24	Configuração da <i>ground station</i>	54
Figura 25	Latência entre estação base e <i>rover</i> em função da distância.....	56
Figura 26	Latência em função da distância.....	57
Figura 27	Ruído de chão no transmissor em função da distância..	58
Figura 28	Ruído de chão no receptor em função da distância	59
Figura 29	Intensidade do sinal em função da distância.....	60

Figura 30	Intensidade do sinal em função da distância.....	61
-----------	--------------------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Fontes de erro no GNSS	29
Tabela 2	Características gerais dos módulos	43
Tabela 3	Características gerais do ROCKET M5.....	48
Tabela 4	Configuração do rádio.....	54
Tabela 5	Informações dos pontos de coleta de dados.....	55
Tabela 6	Comparação dos valores experimentais com o simulador	61
Tabela 7	Cálculo da relação sinal-ruído em cada ponto.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VANTs	Veículos aéreos não-tripulados.....	23
TOA	<i>Time Of Arrival</i>	26
M	Mega	26
Hz	Hertz	26
C/A	Coarse/Acquisition	27
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>	27
DGNSS	<i>Differential GNSS</i>	29
RTK	<i>Real Time Kinematics</i>	29
SBAS	<i>Satellite-based Augmentation System</i>	29
PPP	<i>Precise Point Positioning</i>	29
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	33
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Siste- mas GNSS	33
NTRIP	<i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i> ...	41
RTCM	<i>Radio Technical Commission for Maritime Services</i>	41
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>	42
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	42
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>	42
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	42
LoRa	<i>Low Power Long Range</i>	43
RF	Rádio Frequência	45
SOC	<i>System on a chip</i>	46
PtP	<i>Point-to-Point</i>	52
SNR	<i>Signal Noise-ratio</i>	62
LAN	<i>Local Area Network</i>	69

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 OBJETIVO GERAL	24
1.1.1 Objetivos específicos	24
2 FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE AS TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO GLOBAL	25
2.1 GNSS	25
2.1.1 DGNSS	29
2.1.2 SBAS	29
2.1.3 PPP	30
2.1.4 RTK	30
3 ESTUDO DA TÉCNICA DE CORREÇÃO DE POSICIONAMENTO EM TEMPO REAL: RTK	33
3.1 ESTAÇÃO BASE	33
3.1.1 RBMC	33
3.2 ROVER	34
3.3 RTK	34
3.3.1 RTKLIB	37
3.4 DRONE ETHERCOPTER X6 4S	37
3.5 SOFTWARE ETHERCOPTER RTK-PPK V10	38
3.5.1 Interface gráfica	38
4 PROTOCOLOS UTILIZADOS NA COMUNICAÇÃO ENTRE A ESTAÇÃO BASE E O ROVER	41
4.1 PROTOCOLO NTRIP	41
4.2 PROTOCOLO TCP	42
4.3 PROTOCOLO IEEE 802.11A	42
5 TECNOLOGIAS DE RÁDIO ESTUDADOS	43
5.1 LORA	43
5.2 TELEMETRIA 3DR SI 100	45
5.3 XBEE	45
5.4 ESP8266	46
5.5 UBIQUITI ROCKET M5	47
6 METODOLOGIA	49
6.1 ÁREA DE ESTUDO	49
6.2 COMUNICAÇÃO ENTRE ESTAÇÃO BASE E ROVER	51
6.3 DADOS A SEREM COLETADOS	51
6.4 CONFIGURAÇÃO DO RÁDIO	53
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55

7.1 LATÊNCIA	56
7.2 RUÍDO	57
7.2.1 Transmissor	58
7.2.2 Receptor	58
7.3 POTÊNCIA	59
7.3.1 Simulação	60
7.4 RELAÇÃO SINAL-RUÍDO	62
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
REFERÊNCIAS	65
ANEXO A – Conceitos básicos	69
APÊNDICE A – Apêndice	73

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, cada vez mais veículos aéreos não-tripulados (VANTs), conhecidos como drones, são utilizados para aplicações comerciais.

Esse tipo de aeronave surgiu na década de 1960, restrito ao uso militar, para o reconhecimento de terrenos que permitiu uma visão aérea. Na década de 1970, Israel desenvolveu uma série VANTs destinadas especificamente à vigilância e ao escotismo. Já durante os anos 1980, seu uso possibilitou efetuar operações bélicas onde não havia a necessidade de colocar uma vida humana em risco. Em 2006, com a liberação do uso de drones para o uso civil, a empresa alemã Mikro-kopter foi uma das pioneiras ao lançar drones multi rotores comerciais com Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS), usado para determinar sua localização através de sinais de rádio frequência.

A precisão do posicionamento de um módulo GNSS sem correção é na ordem de metros. Em aplicações como mapeamento, inspeção detalhada e operações com voo autônomo é fundamental que se saiba a localização de um VANT. Para o caso do mapeamento, a precisão exigida na localização é, no mínimo, centimétrica. Com o uso isolado do módulo GNSS isso não pode ser atingido, dada sua precisão métrica. Para isso, a técnica do RTK (do inglês *Real Time Kinematics*) possibilita um monitoramento da localização de forma mais precisa e em tempo real. Essa técnica utiliza um algoritmo capaz de corrigir as imprecisões do receptor GNSS no VANT e é composta por três partes fundamentais: o satélite GNSS, o *rover* e a estação base. Ele usa a localização da estação base como referência para corrigir o erro de posicionamento no *rover*.

O *link* entre o Rover e a estação base pode ser feito de mais de uma forma e a importância do *link* entre os receptores se dá pelo RTK exigir uma latência mínima na comunicação, como também alta confiabilidade.

Para verificar a confiabilidade do *link* foi realizado a coleta de seis pontos entre o *rover* e o rádio que envia os dados da estação base, destacando características importantes como latência, *jitter*, potência de sinal e ruído.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo analisar cinco módulos de rádio que realizam a comunicação entre o *rover* e o ponto de onde os dados da estação base são enviados. Definir o rádio de melhor performance, e fazer testes e análises para verificar a comunicação.

1.1.1 Objetivos específicos

- Realizar um estudo teórico sobre os fundamentos básicos das técnicas de posicionamento global e as técnicas de comunicação entre *rover* e a estação base do RTK.
- Estudar cinco tecnologias dos módulos de rádio.
- Definir e/ou implementar melhor performance do rádio baseado em critérios como: complexidade de implementação, confiabilidade da comunicação, qualidade da conexão e consumo energético.
- Testar em campo o uso do rádio Ubiquiti Rocket M5 da Ubiquiti Networks.
- Coletar seis pontos de amostra para o estudo.
- Processar os dados obtidos no teste.
- Analisar os resultados nas seguintes características: latência, *jitter*, potência do sinal e ruído.
- Concluir e discutir os resultados.
- Definir melhorias para trabalhos e/ou aplicações futuras.

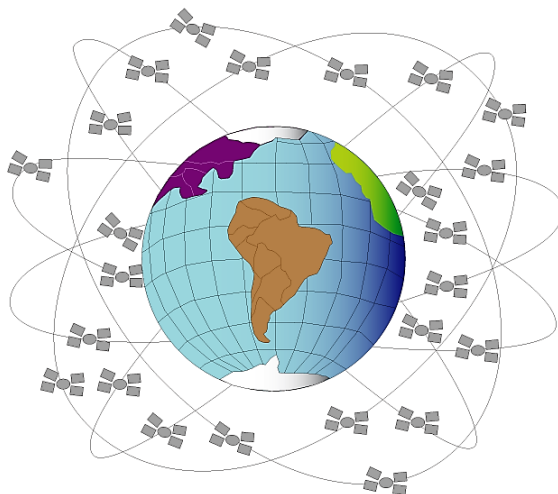
2 FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE AS TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO GLOBAL

O objetivo deste capítulo é discutir os fundamentos básicos sobre as técnicas de posicionamento global, notadamente o GPS (do inglês *Global Positioning System*), e apresentar algumas técnicas que melhoraram a precisão da localização fornecida pelo GPS. Dentre essas está a RTK, foco principal deste trabalho.

2.1 GNSS

O GNSS é um sistema de posicionamento global que se refere a uma constelação de satélites que fornecem sinais do espaço, transmitindo dados de posicionamento e temporização para seus receptores. Esses receptores usam esses dados para determinar a sua localização. A Figura 1 mostra como os satélites estão organizados na órbita terrestre.

Figura 1 – Constelação de satélites

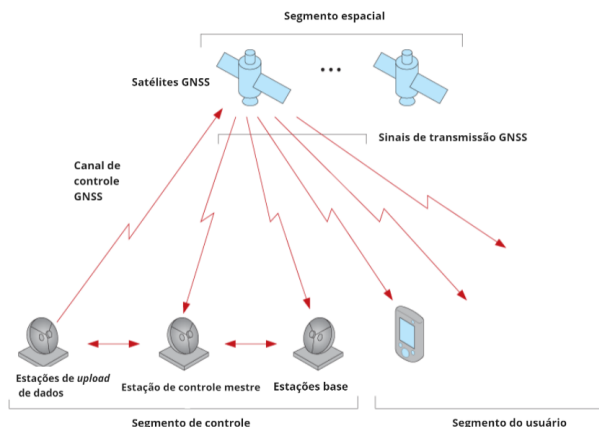


Fonte: Adaptado de NovAtel (2019)

O sistema GNSS é constituído por três partes: o segmento espacial, o segmento do usuário e o segmento de controle. No segmento espacial são usados quatro satélites para determinar a localização de

um ponto: três para o ponto e um para a altura que esse ponto se encontra. O segmento de usuário consiste em equipamentos que processam os sinais recebidos dos satélites GNSS e os utiliza para derivar e aplicar informações de localização e horário. O segmento de controle compreende uma rede terrestre de estações de controle mestre, estações de envio de dados e estações de monitoração (adaptado de GNSS (2019)). A Figura 2 ilustra como esses segmentos são separados.

Figura 2 – Segmentos do sistema GNSS



Fonte: Adaptado de NovAtel (2019)

Diversas regiões do mundo possuem seu próprio sistema de navegação: nos Estados Unidos tem-se o GPS, na Rússia o GLONASS, na China o BeiDou e na Europa o Galileo.

É realizado um cálculo para determinar a localização de um objeto no planeta, esse cálculo consiste em medir o tempo em que o sinal leva do satélite ao receptor em solo, usando o TOA (do inglês *Time of Arrival*). O TOA é o tempo de viagem de um sinal de rádio de um único transmissor para um único receptor remoto, isso faz com que a estimativa TOA de um sinal recebido seja o parâmetro mais importante para a determinação da posição (adaptado de Broumandan e Lin (2001)).

Para exemplificar o sistema de navegação, será utilizado o dos Estados Unidos: o GPS. Os satélites de GPS transmitem sinais continuamente nas frequências portadoras L1 1575,42 MHz e L2 1227,60 MHz. Eles comunicam-se com os receptores GPS usando código pseudo-aleatório ou PRN (do inglês *Pseudorandom noise*), que parece ser aleatório, mas

na verdade é gerado usando registradores de deslocamento por um algoritmo. Os códigos PRN são gerados para cada satélite selecionando diferentes pares de células de cada registrador para definir sua saída (adaptado de Blewitt (1997)). Portanto, todos os códigos PRN são precisamente definidos e cada satélite possui um código PRN exclusivo (adaptado de Süzer e Oktal (2017)). Assim, os receptores conseguem discernir de qual satélite o sinal está vindo (adaptado de 5... (2016)).

Existem dois códigos PRN diferentes para o GPS, um deles é o código C/A (do inglês *Coarse/Acquisition Code*) para aplicações civis, outro é o código de precisão para aplicações militares. O código C/A se repete a cada 1 milissegundo e seu tamanho é 1023 bits. Devido ao fato do código C/A se repetir 1000 vezes por segundo, sua velocidade de transmissão de dados é de 1,023 Mbps. O sinal GPS com código PRN e a mensagem de navegação são transmitidos usando a técnica de modulação BPSK (do inglês *Binary Phase Shift Keying*). O BPSK é uma modulação digital na qual a portadora é transmitida com deslocamento de fase de 0° ou 180° dependendo se 0 ou 1 é transmitido (SÜZER; OKTAL, 2017).

Receptores GPS calculam as distâncias para os satélites em função do tempo que leva para o sinal do satélite atingi-lo. Para fazer esse cálculo, o receptor deve ser capaz de dizer com precisão quando o sinal foi transmitido e recebido. Satélites estão equipados com relógios atômicos extremamente precisos (erro de no máximo dois nanossegundos por dia), de modo que o tempo das transmissões é sempre conhecido, como os receptores em solo contêm relógios de baixo custo, isso tende a ser uma das fontes de erros na medição (adaptado de 5... (2016)).

Sabendo que a velocidade da luz é de aproximadamente $3 \cdot 10^8 m/s$, podemos dizer que a distância é igual à

$$d = c \cdot \Delta t \quad (2.1)$$

onde c é a velocidade da luz e Δt é

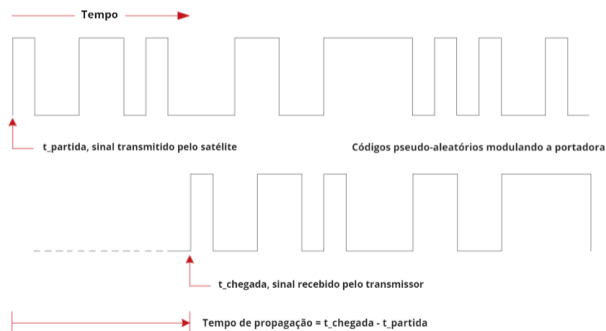
$$\Delta t = t_{chegada} - t_{partida} \quad (2.2)$$

o tempo de propagação, $t_{partida}$ é o momento em que o sinal é emitido pelo satélite e $t_{chegada}$ é o instante em que o sinal é recebido pelo receptor em solo. A Figura 3 ilustra a determinação do tempo de propagação.

Essa distância d é usada como o raio de uma esfera de possíveis localidades para aquele ponto. O mesmo é feito com outros dois satélites. Com as três esferas determinadas, a intersecção entre elas

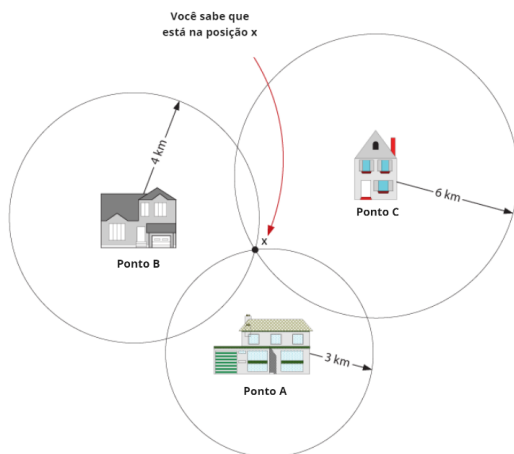
fornece o ponto da localização. Esse método é chamado de trilateração (NOVATEL, 2019). A Figura 4 mostra de forma simples como isso é feito.

Figura 3 – Cálculo do TOA



Fonte: Adaptado de NovAtel (2019)

Figura 4 – Trilateração



Fonte: Adaptado de NovAtel (2019)

Após o cálculo, a precisão da localização fornecida pelo GNSS é na ordem de metros, devido à algumas fontes de erro. As principais fontes de erro são: os relógios dos satélites, variação da órbita, atrasos ionosféricos, atrasos na troposfera, ruído do receptor e multi-percurso. A Tabela 1 mostra o quanto de erro cada uma dessas fontes provoca.

Tabela 1 – Fontes de erro no GNSS

Fonte de erro	Erro (em metros)
Relógios dos Satélites	≈ 2 m
Erros de órbita	≈ 2.5 m
Atrasos na Ionosfera	≈ 5 m
Atrasos na Troposfera	≈ 0.5 m
Ruído do receptor	≈ 0.3 m
Multipercurso	≈ 1 m

Fonte: Adaptado de Chapter... (2019)

O valor eficaz do erro causado por essas fontes é de ≈ 3 m, pois alguns desses erros podem ser amenizados, ou até cancelados. Porém para certas aplicações esse valor ainda é considerado alto. Assim, existem algumas técnicas para diminuir consideravelmente esse erro de precisão, dentre as quais podemos citar: DGNSS, RTK, SBAS e PPP. A técnica do RTK, foco deste trabalho, terá uma breve introdução nesse capítulo, será detalhado no capítulo seguinte.

2.1.1 DGNSS

DGNSS (do inglês *Differential GNSS*) é um tipo de sistema que aprimora as informações da constelação do GNSS usando estações de referência terrestres que permitem a transmissão de informações diferenciais ao segmento do usuário afim de melhorar a precisão de sua posição (adpatado de NovAtel (2019)).

2.1.2 SBAS

SBAS (do inglês *Satellite-based Augmentation System*) é um sistema regional que permite aumentar o desempenho do GNSS. A arquitetura básica de todos os sistemas SBAS é formada por: uma rede de estações terrestres de referência distribuídas por uma ampla área

geográfica (países ou continentes inteiros); uma instalação de processamento central; uma antena de transmissão de dados; um satélite geostacionário. Na prática, o que acontece é que a rede de estações terrestres de referência supervisiona as constelações de satélites GNSS (adaptado de SBAS (2019)).

2.1.3 PPP

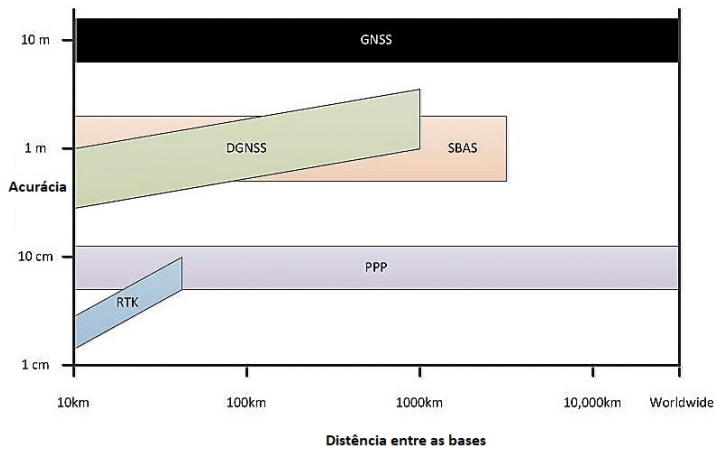
PPP (do inglês *Precise Point Positioning*) é uma técnica de posicionamento que remove ou modela os erros do GNSS para fornecer uma acurácia de posicionamento melhor para um único receptor. Essa solução depende dos relógios dos satélites e correções de órbita, gerados de uma rede de estações de referência. Uma vez que as correções são calculadas, elas são entregues ao usuário via satélite ou pela internet (adaptado de GNSS... (2018)).

2.1.4 RTK

RTK é uma técnica para aprimorar a localização de um objeto móvel com precisão centimétrica, ela utiliza um ponto fixo de coordenadas conhecidas para realizar o cálculo dessa localização.

A Figura 5 mostra a acurácia dessas soluções em função da distância entre o objeto móvel e o ponto fixo.

Figura 5 – Comparação das técnicas DGNSS, SBAS, PPP e RTK em função da distância da base



Fonte: Adaptado de NovAtel (2019)

3 ESTUDO DA TÉCNICA DE CORREÇÃO DE POSICIONAMENTO EM TEMPO REAL: RTK

Como o objetivo desse trabalho é realizar análise utilizando a técnica de RTK, este capítulo discute com detalhes os princípios de funcionamento e a configuração utilizada para realização dos experimentos. O RTK funciona com três componentes básicos: a estação base, o *rover* e o satélite GNSS, que já foi explicado anteriormente.

3.1 ESTAÇÃO BASE

A estação base é composta por um receptor GNSS que fica em um ponto fixo realizando PPP e coletando dados de posicionamento que serão posteriormente usados para corrigir outros receptores GNSS que são móveis.

Para este trabalho o servidor que fornece os dados de estações base usado será o do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), que possui uma rede de monitoramento de sistemas GNSS através da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS). Para se obter os dados das estações base, um cadastro gratuito deve ser feito na página *web* da RBMC. Um *login* e uma senha devem ser utilizados na hora de se receber os dados.

3.1.1 RBMC

Segundo Medina a definição de RBMC é:

Conjunto de estações geodésicas, equipadas com receptores GNSS de alto desempenho, que proporcionam, uma vez por dia ou em tempo real, observações para a determinação de coordenadas (MEDINA, 2018).

Ela coleta os dados de localização de estações bases espalhadas pelo Brasil e esses dados ficam disponíveis no servidor do IBGE.

A cidade de Florianópolis possui duas estações bases do IBGE: uma no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), localizada no centro e outra na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), localizada no bairro Trindade, que será a utilizada neste trabalho.

3.2 ROVER

É um objeto móvel que contém um receptor GNSS que coleta os dados de sua localização e onde o algoritmo do RTK é executado. Um *rover* pode ser um barco, um carro ou um veículo aéreo. Neste trabalho, o *rover* será um veículo aéreo não tripulado.

Veículo aéreo não tripulado (VANT) ou drone (do Inglês, zangão), é todo e qualquer tipo de aeronave que pode ser controlada nos 3 eixos e que não necessite de pilotos embarcados para ser guiada (DECEA, 2010).

A Figura 6 mostra uma das aeronaves da empresa alemã *Mikrokopter*, fabricante do VANT usado neste trabalho, que daqui para frente será referenciado apenas como *rover*.

Figura 6 – VANT MK 6S12 Mikrokopter



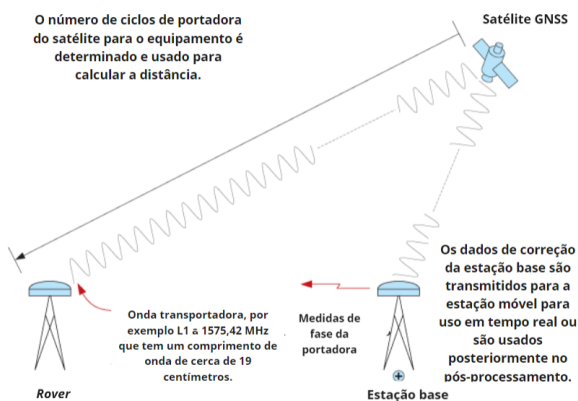
Fonte: Adaptado de MikroKopter (2014)

3.3 RTK

O RTK é uma técnica usada para aumentar a precisão da posição em tempo real relativa com base nos princípios do DGNSS que calcula

o erro de posicionamento de um objeto móvel em relação a um ponto estacionário. Ela é composta por três partes principais: os satélites GNSS, a estação base e o *rover* como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Elementos principais do RTK

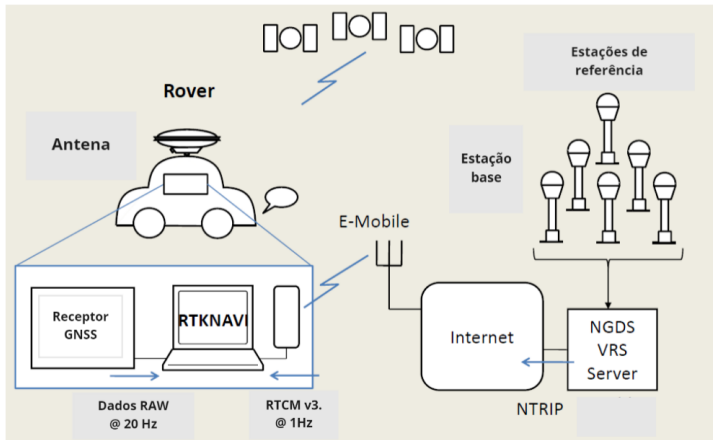


Fonte: Adaptado de NovAtel (2019)

Tanto a estação base quanto o *rover* recebem dados do satélite GNSS e o *rover* corrige sua posição, usando um algoritmo baseado no filtro de Kalman.

A Figura 8 mostra de maneira mais detalhada como os dados da estação base chegam ao *rover*. As estações de referência (composto pelas estações base) enviam os dados de localização para um servidor que os envia à internet, através do protocolo NTRIP. O *rover* em movimento possui um computador de bordo com acesso a internet que acessa a nuvem para receber os dados da estação base.

Figura 8 – Elementos principais do RTK



Fonte: Adaptado de NovAtel (2019)

Neste trabalho, as correções de posicionamento do *rover* são transmitidas com alta acurácia para o controlador de voo do VANT em tempo real.

Durante a execução do RTK existem três tipos de soluções que medem sua qualidade e que serão entregues pelo algoritmo:

- **Single:** Solução onde o *rover* não está recebendo dados da estação base para fazer as correções de posicionamento. Assim, a acurácia é a do GNSS comum.
- **RTK Float:** Solução em que o *rover* já está recebendo os dados da estação base, porém a solução ainda não está em acurácia centimétrica.
- **RTK FIX:** Solução onde os dados da base são entregues para o *rover* e apresenta alta precisão.

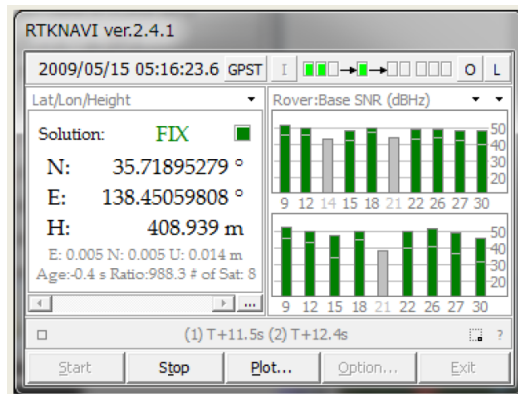
Um dos parâmetros mais importantes para determinar se a base e o *rover* estão se comunicando corretamente é o AGE. Ele é uma variável que mostra o atraso entre os dados que saem da estação base e chegam no *rover* e seu valor é dado em segundos, que deve ficar abaixo de dois segundos para que o tenha-se uma solução RTK de qualidade. A distância entre estação base e *rover* é de no máximo 50 km.

3.3.1 RTKLIB

RTKLIB é um pacote de programas de código aberto para o posicionamento utilizando GNSS. Ele fornece uma maneira de baixo custo do uso do RTK (adaptado de Encarnacion e Tiglaio (2016)).

O RTKLIB vem com um simulador de GPS e modelos de erro. Pode ser usado também como plataforma de pós-processamento e como biblioteca de localização ou componente para dispositivos móveis GPS. A Figura 9 mostra a interface do RTKNAVI, um programa do RTKLIB que mostra a qualidade da solução RTK. O item *Solution* informa em qual das três soluções o RTK está. As letras N e E fornecem a localização fornecida pelo RTK e H a altura que ele registra que o rover se encontra.

Figura 9 – RTKNAVI



Fonte: *Printscreen* de um dos programas do RTKLIB

3.4 DRONE ETHERCOPTER X6 4S

O EtherCopter X6 4S da empresa Novarum Sky é o *rover* usado neste trabalho, que pode ser visualizado na Figura 10. Ele possui seis motores, como também é equipado com uma câmera de alta resolução e realiza mapeamento com alta acurácia através da técnica do Georreferenciamento Direto rodando o *software* EtherCopter RTK / PPK V10 em seu computador de bordo Raspberry Pi dedicado para proces-

samento de sinais digitais.

Figura 10 – Aeronave utilizada nos testes



Fonte: Autoria própria

3.5 SOFTWARE ETHERCOPTER RTK-PPK V10

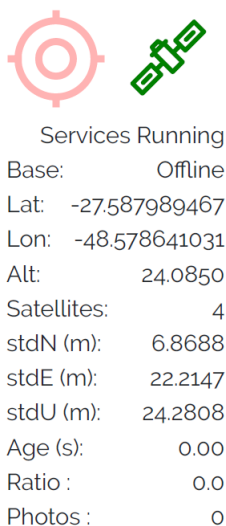
O Software EtherCopter RTK-PPK V10 desenvolvido pela empresa Novarum Sky permite realizar serviço de aerolevantamento com Drone e para geração de mapas cartográficos com acurácia de até 3 cm sem Pontos de Controle (CP) ou acurácia melhor que 10 mm horizontal utilizando Pontos de Controle em solo, em áreas pequenas ou grandes, trazendo vantagens sobre as metodologias tradicionais de topografia. Ele roda no computador de bordo do *rover*, a Raspberry Pi, utilizando o RTKLIB (SOFTWARE..., 2018).

3.5.1 Interface gráfica

A interface do *software* desenvolvido pela empresa, é feita de tal forma que pode-se ligar e desligar o RTK, como também analisar a qualidade da solução em tempo real. Para que se possa realizar o teste corretamente, é importante entender como funciona a interface gráfica, que pode ser visualizada na Figura 11, resaltando as partes mais importantes para este trabalho.

Na Figura 11, pode-se ver a informação do AGE. O ícone ao lado do satélite mostra a qualidade da solução. A cor do ícone indica a qualidade da solução, dessa forma, a cor vermelha indica *Single*, a cor amarela indica o *RTK Float* e finalmente quando está verde, o *RTK FIX*.

Figura 11 – *Printscreen* das informações de funcionamento



Fonte: *Printscreen* de parte da interface do produto

4 PROTOCOLOS UTILIZADOS NA COMUNICAÇÃO ENTRE A ESTAÇÃO BASE E O ROVER

Este capítulo abordará os protocolos envolvidos na comunicação entre estação base e rover na técnica de RTK. A definição do que é um protocolo e LAN podem ser encontrados no Anexo A deste trabalho.

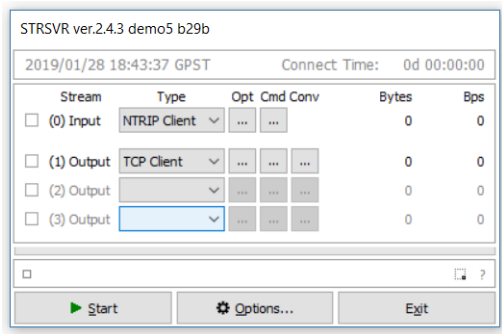
4.1 PROTOCOLO NTRIP

NTRIP (do inglês *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) é um protocolo composto por três partes: NRTIP *Client*, NTRIP *Server* e NTRIP *Caster*.

O NTRIP *Server* cria um *link* de transferência de dados da estação base ao servidor *Caster*. O servidor *Caster*, por sua vez, distribui os dados de correção RTCM e o cliente cuja coletora recebe as correções enviadas pelo servidor *Caster* (adaptado de RTK/NTRIP (2018)).

Para este trabalho, o NTRIP *Client* será o computador que irá receber os dados de posicionamento da estação base. A Figura 12 ilustra a interface de um dos programas do RTKLIB, o STRSVR, que recebe os dados da estação base e transmite para o canal que chegará ao rover através do protocolo TCP.

Figura 12 – Interface NTRIP no RTKLIB



Fonte: *Printscreen* da interface do protocolo NTRIP no RTKLIB

4.2 PROTOCOLO TCP

O TCP (do inglês *Transmission Control Protocol* ou Protocolo de Controle de Transmissão) é um dos principais protocolos da camada de transporte do modelo TCP/IP. Esse protocolo garante que os dados entregues sejam livres de erro, em sequência e sem perdas ou duplicação (adaptado de Protocolo... (2015)).

O TCP possui um componente que lida com entrada/saída (E/S) da rede e para a rede. Quando um pacote chega, ele valida os endereços e coloca o pacote em uma fila. Um conjunto de *buffers* pode ser configurado para lidar com chegadas e, se todos os *buffers* disponíveis forem usados, as chegadas são descartados, pois os pacotes não reconhecidos serão retransmitidos (adaptado de Cerf e Kahn (1974)).

4.3 PROTOCOLO IEEE 802.11A

O padrão IEEE 802.11a é o primeiro padrão da série IEEE 802.11. Ele define um formato WiFi para fornecer conectividade sem fio na banda ISM (do inglês *Industrial, Scientific and Medical*) de 5.8 GHz para fornecer velocidades de dados de até 54 Mbps (adaptado de Hiertz et al. (2010)). O que permite que ele seja usado em todo o mundo em uma banda livre de licença.

A modulação usada por esse protocolo é a OFDM (do inglês *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para permitir a transferência de dados a uma taxa máxima de 54 Mbps, embora um nível prático mais realista esteja na faixa de 20 Mbps. A taxa de dados pode ser reduzida para 48, 36, 24, 18, 12, 9 e depois 6 Mbit / s, se necessário. O protocolo IEEE 802.11a possui 12 canais não sobrepostos, 8 dedicados a ambientes internos e 4 a conexões ponto a ponto.

5 TECNOLOGIAS DE RÁDIO ESTUDADOS

Este capítulo descreve os módulos de rádios que foram estudados e/ou implementados, a fim de definir uma tecnologia para dar prosseguimento ao estudo. Os critérios para selecionar a tecnologia foram:

- 1. Taxa de transferência de dados de no mínimo 2,5 kbps;
- 2. Complexidade de implementação;
- 3. Confiabilidade e estabilidade na comunicação.

Cinco módulos de rádio foram estudados. A Tabela 2 mostra essas tecnologias e suas características como: frequência de operação, protocolo e alcance.

Tabela 2 – Características gerais dos módulos

Tecnologia	Freq. de op.	Protocolo	Alcance
LoRa	868/915 MHz	LoRaWAN	até 15 km
Telemetria 3DR	433 MHz	WiFi	90 m
XBee	2,4 GHz	IEEE 802.15.4	90-1500 m
ESP8266	2,4 GHz	IEEE 802.11 b/g/n	até 140 m
Rocket M5	5,8 GHz	IEEE 802.11a	até 50 km

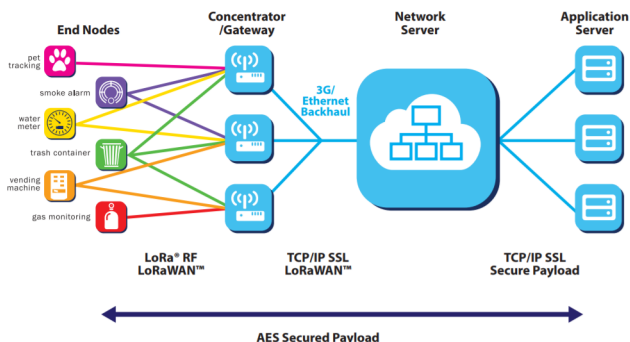
Fonte: Autoria própria

5.1 LORA

Rádio LoRa (do inglês *Low Power Long Range*) é uma tecnologia de rádio frequência que possui longo alcance com o mínimo de consumo de energia. LoRaWAN é o nome dado ao protocolo que define a arquitetura do sistema bem como os parâmetros de comunicação usando a tecnologia LoRa (adaptado de Semtech (2019)).

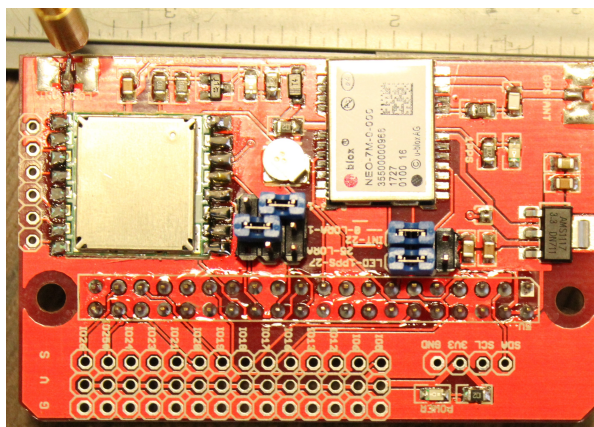
A especificação LoRaWAN é um protocolo de rede LPWA (do inglês *Low Power, Wide Area*) projetado para conectar 'coisas' sem fio operadas por bateria à Internet em redes regionais, nacionais ou globais, e tem como alvo os principais requisitos da IoT (do inglês *Internet of Things*), como serviços de comunicação bidirecional, segurança *end-to-end*, mobilidade e serviços de localização. A Figura 13 ilustra como funciona o sistema e a Figura 14 mostra o módulo que foi estudado.

Figura 13 – Estrutura da rede



Fonte: Adaptado de LoRa... (2015)

Figura 14 – Módulo LoRa



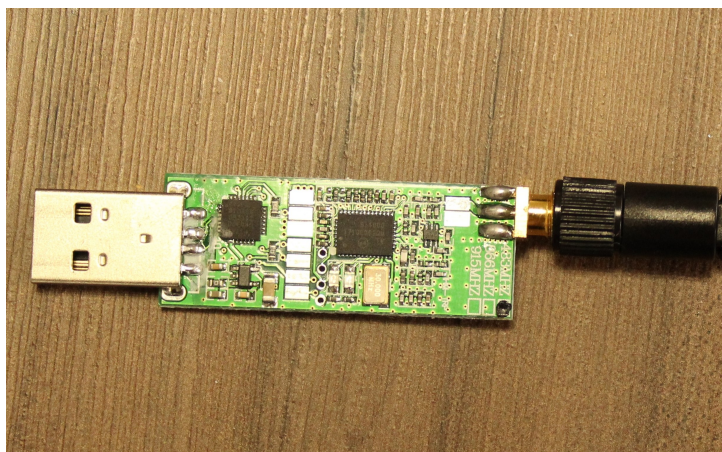
Fonte: Autoria própria

Após o estudo da arquitetura dessa tecnologia, ela não será utilizada dada a complexidade do protocolo de comunicação. Seria necessário uso de um *gateway* para que a *ground station* conseguisse enviar os dados para o *rover* e envolveria um dispositivo a mais no sistema.

5.2 TELEMETRIA 3DR SI 100

O Kit de Telemetria 3DR Radio 433 MHz foi concebido como um conjunto opcional aos módulos XBEEs de rádio, com a proposta de menor custo. Os rádios 3DR fornecem um link de dados *air-to-ground* entre o piloto automático e o laptop ou tablet da estação terrestre. A Figura 15 mostra o módulo 3DR que foi estudado.

Figura 15 – Módulo 3DR



Fonte: Autoria própria

Alguns testes *indoor* foram realizados utilizando o dispositivo, porém constatou-se uma alta complexidade de configuração do par de rádios como também uma grande oscilação na comunicação além do baixo alcance.

5.3 XBEE

Os módulos XBee, são módulos RF (Rádio Frequência) que fazem comunicações no padrão IEEE 802.15.4. Esse protocolo permite comunicações robustas e opera na frequência ISM. Os módulos XBee não requerem especificamente conexões específicas de circuitos externos para operação adequada. A Figura 16 mostra o módulo XBee S1.

Figura 16 – Módulo XBee



Fonte: Autoria própria

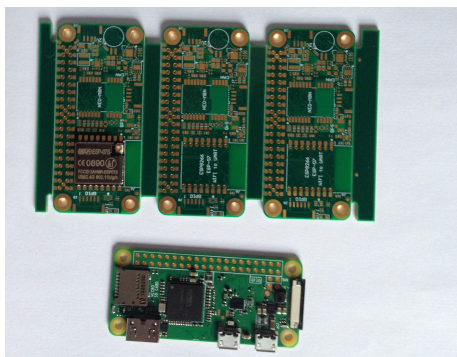
Após uma pesquisa mais aprofundada na tecnologia e nos *reviews* de usuários do módulo em si, ele foi descartado devido ao baixo alcance e a insuficiência de taxa de transferência (≈ 196 bps).

5.4 ESP8266

O módulo WiFi ESP8266 é um SOC (do inglês *System on a chip*) com protocolo TCP/IP integrado que consegue dar a qualquer microcontrolador acesso a sua rede WiFi. O ESP8266 é capaz tanto de hospedar uma aplicação quanto descarregar todas as funções de redes WiFi a partir de outro processador de aplicação. A Figura 18 mostra o módulo que seria usado inicialmente.

Após a realização de testes *indoor* a confiabilidade da conexão não pode ser garantida, como também o dispositivo apresentou instabilidade.

Figura 17 – Módulo ESP8266



Fonte: Autoria própria

5.5 UBIQUITI ROCKET M5

É um rádio fabricado pela empresa norte americana Ubiquiti Networks que opera na frequência de 5.8 GHz (UBIQUITI..., 2019) e ele foi o escolhido para realizar os testes em campo, dado que cumpre todos os requisitos propostos. A Tabela 3 mostra suas principais características além das já citadas na Tabela 2.

Contando com as tecnologias MIMO (do inglês *Multiple-input and multiple-output*) do padrão 802.11n e o protocolo *AirMax* da Ubiquiti, permite que o Rocket M5 em conjunto com as antenas *BaseStation* possa fornecer a qualidade e velocidade necessária para equipamentos que são pontos de acesso para clientes e a resistência para operar em enlaces com grandes distancias com qualidade máxima. Sua fonte permite *reset* remoto, assim se houver algum problema o Rocket M5 pode ser reconfigurado sem precisar do equipamento em mãos. Ele foi projetado para ser usado como: Provedor de internet, distribuidor de internet e para câmeras ip pra vigilância onde não há cabeamento.

Para este trabalho o módulo será configurado para que use o protocolo IEEE 802.11a. A alimentação pelo PoE (do inglês *Power over Ethernet*) será útil para alimentar o rádio que estará no *rover*.

A Figura 18 representa o modelo de rádio implementado, Rocket M5.

Tabela 3 – Características gerais do ROCKET M5

Parâmetro	Configuração
Tensão de alimentação	24V, 1A
Potência de saída	Alimentação pelo POE incluso
Peso	27 dBm (500mW)
Consumo de potência máximo	0,5 kg
Temperatura de operação	8 W
Taxa máxima de transferência de dados	-30° a 70° C
	até 150 Mbps

Fonte: *Datasheet* do fabricante

Figura 18 – Rádio UBIQUITI Rocket M5



Fonte: Adaptado de Ubiquiti... (2019)

6 METODOLOGIA

Ao longo do trabalho foram realizadas pesquisas em artigos, manuais de produtos e dissertações, e após o estudo, definiu-se como técnica de aperfeiçoamento do desempenho do GNSS, o RTK, explicados nos capítulos 2 e 3 desse documento. Os protocolos envolvidos na comunicação entre a estação base e o *rover* foram o TCP, NTRIP e IEEE 802.11a, descritos no capítulo 4. Para a implementação de rádio, optou-se pelo módulo Rocket M5, descrito no capítulo 5.

Assim, as tecnologias de RTK e de rádio foram embarcadas no *rover*, utilizando-o para coletar os pontos de informação para validar ou não o uso do rádio. Foram feitas seis medições com o *rover*, para comparar diversos parâmetros de acordo com a distância.

Esse capítulo descreve como os dados foram coletados. O capítulo 7, mostra o processamento desses dados, juntamente com uma análise e discussão. Por fim, no capítulo 8, é inferido o que foi estudado e apresentado abordagens para melhorias e trabalhos futuros.

6.1 ÁREA DE ESTUDO

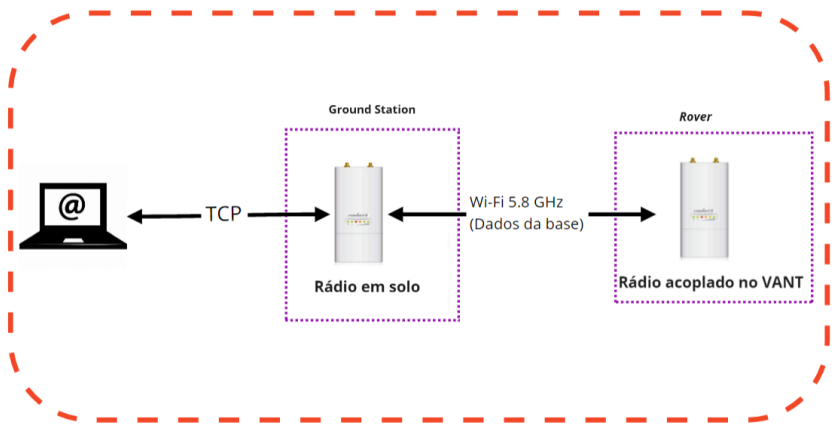
A Figura 19 mostra a área de estudo para o experimento, que está localizada no bairro Estreito em Florianópolis, Santa Catarina. Para o estudo, será considerado seis pontos, que estão distribuídos na imagem. As marcações em vermelho, mostram a localização dos pontos onde foi feita a coleta de dados e a marcação em laranja, onde estava localizada a *ground station*, de onde os dados da base são enviados ao *rover*.

A Figura 20 mostra o *rover* como também o prédio onde a *ground station* estava localizada, demarcada em amarelo.

6.2 COMUNICAÇÃO ENTRE ESTAÇÃO BASE E ROVER

O computador que acessa a estação base virtual ficou na empresa Novarum Sky juntamente com o rádio da *ground station*. Os dados da estação base foram obtidos através do protocolo NTRIP utilizando o programa STRSVR do RTKLIB, como pode ser visualizado na Figura 12. No *input* devem ser inseridos *login* e senha previamente cadastrados na página *web* da RBMC. No *output*, deve-se configurar usando o protocolo TCP (configurado como TCP *client*) para enviar os dados à *ground station*. Assim, os rádios se comunicarão através do Wi-Fi 5,8 GHz. A Figura 21 mostra como será feita a comunicação.

Figura 21 – Esquemático da comunicação entre a *ground station* e a *rover*



Fonte: Autoria própria

6.3 DADOS A SEREM COLETADOS

Ao longo do experimento em campo foi extraído as seguintes informações da interface do rádio e do *software*:

- Latência do rádio;
- Ruído do rádio;

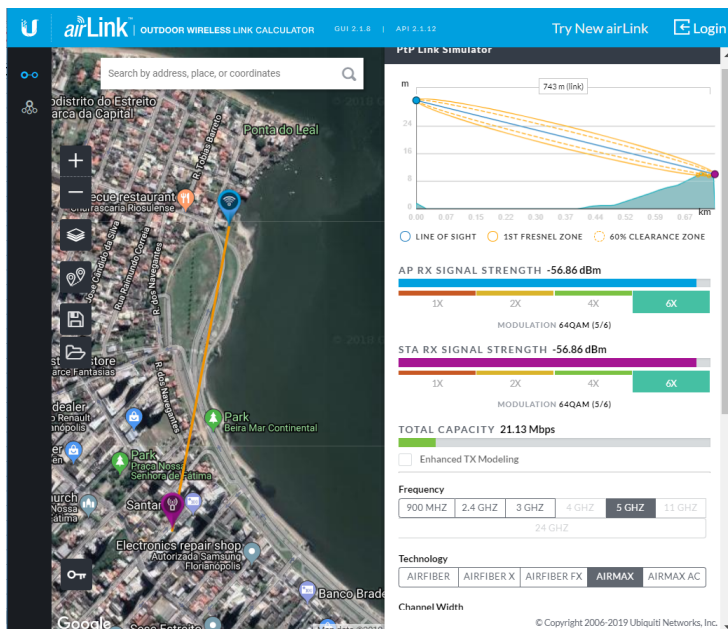
- Potência do sinal do rádio.

Após a coleta dos dados será feito o processamento e estudo de como esses parâmetros se comportam a medida em que se altera a distância entre os rádios. Para a potência do sinal, é possível fazer uma comparação dos valores registrados com uma simulação.

Para isso, utiliza-se o simulador *online* disponibilizado pelo fabricante do módulo de rádio. Ele considera obstrução apenas o relevo, não levando em conta construções. As medidas de potência de sinal fornecidas pelo simulador serão consideradas como medidas teóricas para o cálculo de erro relativo.

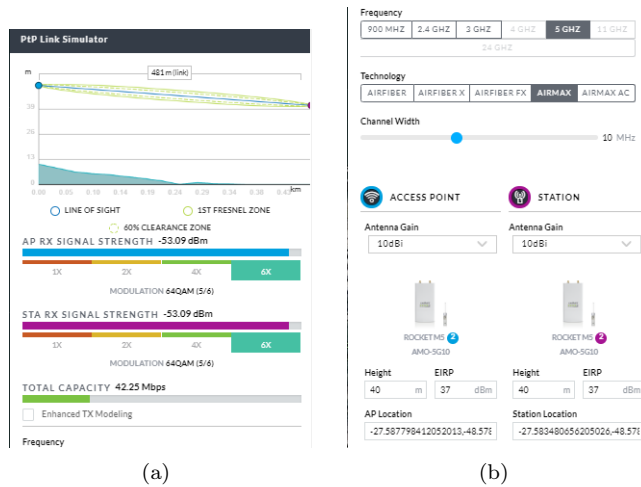
O simulador pode ser configurado de duas maneiras, ptp (do inglês *point-to-point*) ou ptmp (do inglês *point-to-multipoint*). Será configurado no modo ptp, pois o teste foi realizado apenas com um dispositivo conectado ao rádio. A Figura 22 mostra a interface do simulador e a Figura 23 mostra como o simulador foi configurado.

Figura 22 – Interface do simulador



Fonte: *Printscreen* do simulador

Figura 23 – Configuração do simulador

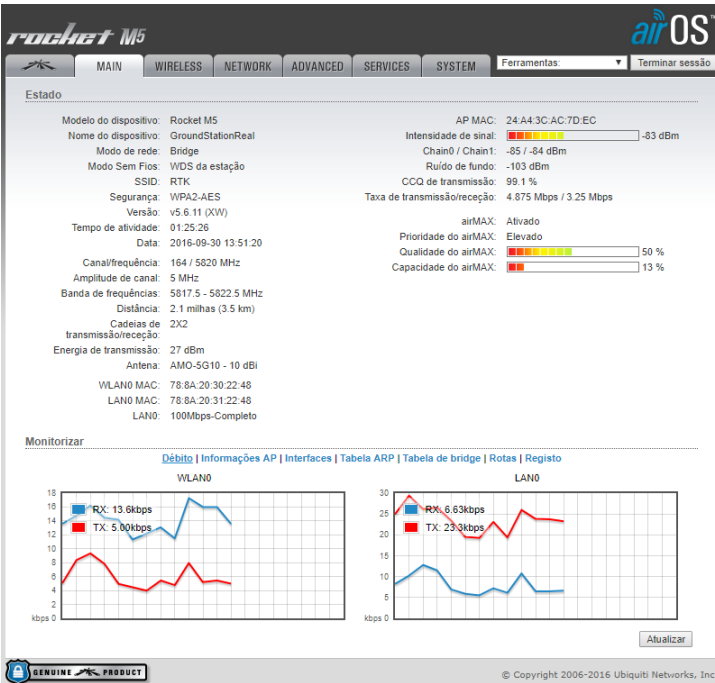


Fonte: Adaptado do *printscreen* do simulador

6.4 CONFIGURAÇÃO DO RÁDIO

Como o módulo é bastante robusto, existem diversas maneiras de configurá-lo. O modo de rede foi configurado como *Bridge* pois tinha-se apenas um dispositivo conectado com o rádio. O modo sem fio foi configurado como ponto de acesso WDS para que se possa acessar a interface do rádio utilizando seu endereço de IP, através de qualquer computador, ou seja, de forma remota. A amplitude do canal foi definida com 5 MHz, pois com essa frequência o gasto energético será menor e a taxa de transferência é mais do que suficiente para a aplicação. A potência de transmissão foi definida como a máxima da configuração, 27 dBm, para extrair o máximo desempenho do dispositivo. O dispositivo usa o canal e a frequência de rádio especificados para transmitir e receber dados. O canal válido e as faixas de frequência irão variar dependendo dos regulamentos do país onde o rádio está sendo usado. As demais configurações não interferiam na aplicação. A Figura 24 mostra a interface do rádio com a configuração da *ground station* e a Tabela 4 com as configurações mais importantes.

Figura 24 – Configuração da *ground station*



Fonte: *Printscreen*da configuração do rádio

Tabela 4 – Configuração do rádio

Parâmetro	Configuração
Modo de rede	Bridge
Modo sem fio	Ponto de acesso WDS
SSDI (nome da rede)	RTK
Canal/Frequência	164/5820 MHz
Amplitude do canal	5 MHz
Banda de frequências	5817.5 - 5822.5 MHz
Energia de transmissão	27 dBm
Taxa de transmissão	4.875 Mbps

Fonte: Autoria própria

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante os testes em campo aberto, foram coletados dados de seis pontos para analisar a qualidade da comunicação entre os rádios. O experimento começou de um ponto mais distante à aproximadamente 750 m de onde a *ground* estava localizada e o *rover* foi colocado cada vez mais próximo de onde os dados da base eram enviados. A Tabela 5 mostra a ordem dos pontos coletados como também a qualidade da solução RTK nos pontos. Todo os gráficos com o processamento dos dados foi feito no programa MATLAB.

Na Tabela 5 o segundo ponto coletado não apresentou uma boa solução RTK , pois o número de satélites que estavam sendo observados naquele ponto era insuficiente para se chegar ao RTK Fix. Para o cálculo do *jitter* este ponto terá de ser desconsiderado dado que quando se tem RTK Float o atraso entre estação base e *rover* atinge valores que fornecem uma baixa qualidade na solução.

Tabela 5 – Informações dos pontos de coleta de dados

Ponto	Coordenada	Qualidade da solução	Distância
1	Lat: -27.581437435 Lon: -48.577142035	RTK Fix	744 m
2	Lat: -27.581859579 Lon: -48.577569998	RTK Float	691 m
3	Lat: -27.582449122 Lon: -48.577581816	RTK Fix	626 m
4	Lat: -27.583310497 Lon: -48.577585403	RTK Fix	532 m
5	Lat: -27.583465695 Lon: -48.578076730	RTK Fix	509 m
6	Lat: -27.584358761 Lon: -48.578091723	RTK Fix	411 m

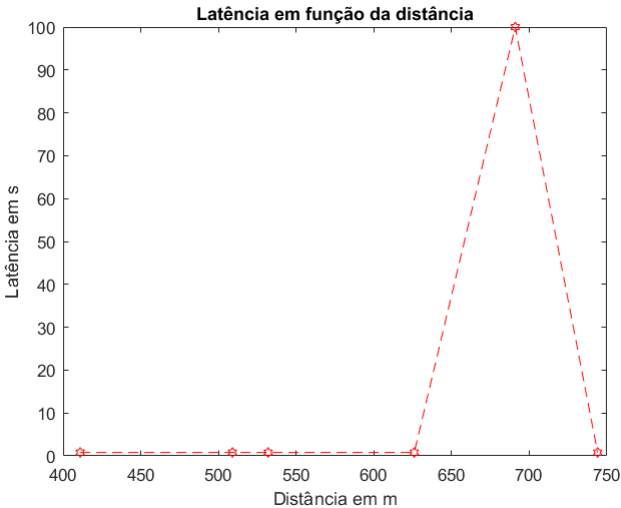
Fonte: Autoria própria

Nos gráficos a seguir os pontos foram dispostos em ordem crescente de distância, ao contrário da maneira como foram coletados a fim de se observar como os parâmetros analisados se comportam a medida que a distância entre os módulos aumenta.

7.1 LATÊNCIA

A partir dos dados de latência coletados, como mostra o gráfico da Figura 25, o ponto onde a solução era RTK Float (com um atraso entre estação base e *rover* de 100 segundos) deixa evidente a importância de se obter valores abaixo de 2 segundos para uma solução de qualidade. Nos demais pontos onde os valores eram de 0,8 segundos a qualidade da solução foi a ideal.

Figura 25 – Latência entre estação base e *rover* em função da distância



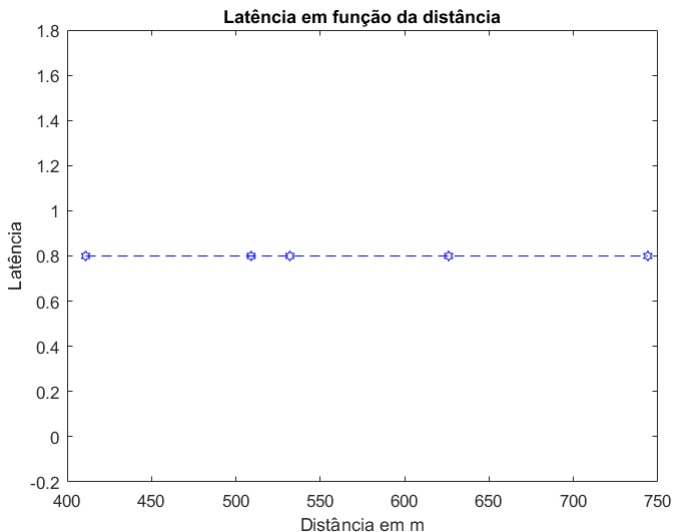
Fonte: Autoria própria

Com o aumento da distância entre os rádios, os valores de latência ficam constantes. Com isso, pode-se concluir que para o quesito de latência o módulo de rádio se encaixa na exigência inicial. Tanto pela constância dos valores como pelos mesmos se apresentarem abaixo dos 2 segundos.

Como a média dos dados de latência fornece o *jitter*, pode-se calcular a qualidade da comunicação. A definição completa de *jitter* pode ser encontrada no anexo A deste trabalho. O cálculo será realizado sem o segundo ponto coletado por motivos já citados anteriormente. Na Figura 26 comprova-se o que o *jitter* nos pontos coletados é zero, dado

que não há variação no eixo Y do gráfico que representa a latência dos pacotes de dados enviados.

Figura 26 – Latência em função da distância



Fonte: Autoria própria

7.2 RUÍDO

Na interface do rádio, o valor (em dBm) exibe o ruído de toda a inferência causada pelo ambiente, como por exemplo, as condições climáticas. O receptor "ouve" esse ruído na frequência em que está operando. O dispositivo considera o ruído de chão enquanto avalia a qualidade do sinal (como SNR e RSSI).

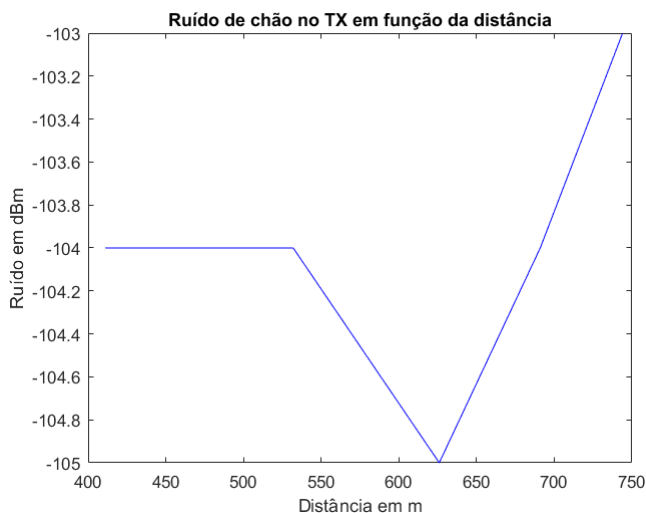
Para um bom funcionamento, quanto mais baixo o valor do ruído, melhor. Assim, bons níveis giram em torno de -102 dBm. Níveis menores como -105 dBm, -107 dBm são mais raros em ambientes urbanos.

7.2.1 Transmissor

A Figura 27 mostra a variação do ruído com a distância. O valor médio dos 6 pontos coletados é de -104 dBm, o que indica um bom valor de ruído no transmissor.

No ponto a 744m de distância, o ruído atinge o valor de -103 dBm, devido ao fato de que havia interferência por construções e relevo nesse ponto. Porém, o valor pouco varia em comparação à média dos pontos, não sendo considerado significativo.

Figura 27 – Ruído de chão no transmissor em função da distância

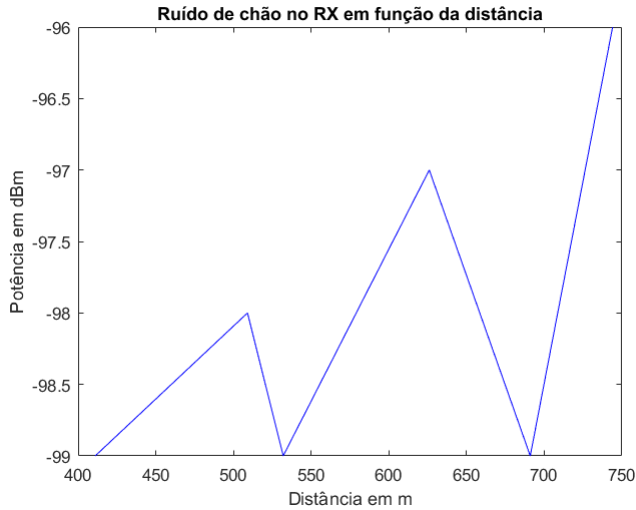


Fonte: Autoria própria

7.2.2 Receptor

A Figura 28 mostra a variação do ruído no receptor a medida em que a distância aumenta. O valor médio dos 6 pontos coletados é de -98 dBm, o que indica um valor considerado um pouco abaixo do ideal, porém a flutuação do valor é baixa, dado que a 411 m o ruído é de -99 dBm e a 744m o ruído é de -96 dbm. Isso pode ter diversas causas como ventos, umidade do ar e obstáculos causados por construções.

Figura 28 – Ruído de chão no receptor em função da distância



Fonte: Autoria própria

Comparando o ruído no transmissor com o receptor, nota-se que há um ruído maior no receptor. O receptor tende a sofrer mais com interferências climáticas dado que estava em campo aberto, enquanto o transmissor estava de certa forma protegido pelas paredes da construção onde a *ground station* estava localizada. Consegue-se concluir que os resultados do ruído no TX e RX são satisfatórios para a aplicação desejada.

7.3 POTÊNCIA

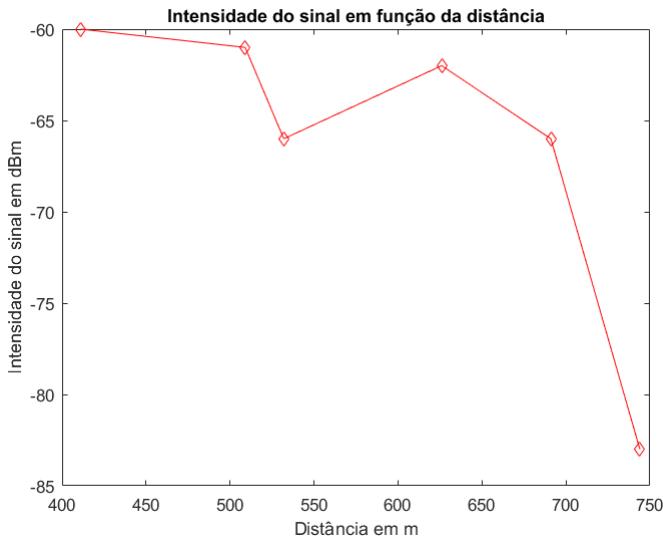
O fabricante indica que os valores de potência do sinal recebido devem estar entre -50 e -70 dBm.

A Figura 29 mostra a intensidade do sinal em função da distância. Com exceção do primeiro ponto coletado, nota-se que os valores da intensidade variam entre -60 e -66 dBm, que estão dentro do que o fabricante indica como bom. A linha de visada do primeiro ponto (a 744 m) não estava boa, pois a posição estava a cerca de 1 m abaixo do nível da rua e bem em frente havia uma rocha. Com isso a interface

do rádio mostrou uma potência de sinal no valor de -83 dBm, que é considerado ruim e mostrou que o *rover* estava a 3,5 km de distância.

Nos pontos 2 e 4 coletados, tem-se uma intensidade de sinal de -66 dBm. Isso se dá pelo fato de que em ambas posições perdem um pouco da linha de visada pela construção que existe na esquina da rua Fulvio Aducci com a rua Maria Catarina da Rosa, o Centro Executivo Expedicionário. Se não fosse por esse prédio, os resultados se apresentariam de forma aproximadamente linear com o aumento da distância.

Figura 29 – Intensidade do sinal em função da distância



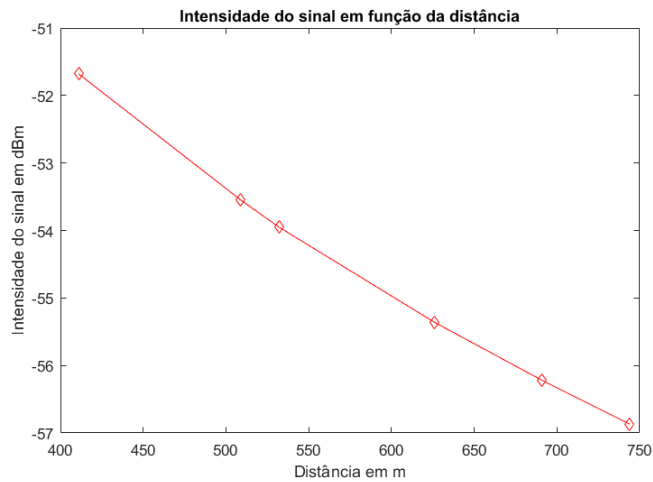
Fonte: Autoria própria

7.3.1 Simulação

A Figura 30 mostra como fica a intensidade do sinal em função da distância entre os módulos. Pode-se observar que a intensidade do sinal pouco sofre atenuação com a distância na simulação, dado que o simulador não considera as construções civis como obstrução.

A Tabela 6 compara os valores de potência do sinal experimen-

Figura 30 – Intensidade do sinal em função da distância



Fonte: Autoria própria

tais com os simulados, mostrando também os valores de erro relativo tendo como valor verdadeiro o fornecido pelo simulador. Os pontos que apresentaram maior erro relativo foram aqueles em que a medida foi prejudicada pelas obstruções dos prédios nas redondezas. Os pontos onde a linha de visada entre os rádios estava boa representaram os menores erros.

Tabela 6 – Comparação dos valores experimentais com o simulador

Ponto	Pot. do sinal em campo	Pot. do sinal no simulador	Erro relativo
1	-83 dBm	-56.87 dBm	45,6 %
2	-66 dBm	-56.22 dBm	17,4 %
3	-62 dBm	-55.36 dBm	12 %
4	-66 dBm	-53.95 dBm	22,3 %
5	-61 dBm	-53.55 dBm	14 %
6	-60 dBm	-51.68 dBm	16,1 %

Fonte: Autoria própria

Com isso, pode-se concluir que, em ambientes urbanos, o uso de uma tecnologia na frequência de 5,8 GHz deve ser feito com certa cautela. Tendo em mente que a aplicação do rádio é para locais onde existem poucas construções civis, a intensidade do sinal será forte o suficiente para transmitir os dados da estação base ao *rover*.

7.4 RELAÇÃO SINAL-RUÍDO

Com os valores de potência de sinal e ruído no transmissor, pode-se obter a relação sinal-ruído em cada ponto. Os valores calculados podem ser visualizados na Tabela 7. O fabricante indica valores entre 20 e 50 dB para uma boa conexão. Valores acima de 50 dB podem fazer com que o rádio sature. Novamente o primeiro ponto apresenta um SNR muito próximo ao limite inferior desejado devido ao erro causado pelos obstáculos do relevo.

Tabela 7 – Cálculo da relação sinal-ruído em cada ponto

Ponto	Relação sinal-ruído
1	20 dB
2	38 dB
3	43 dB
4	38 dB
5	43 dB
6	44 dB

Fonte: Autoria própria

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo inicial do trabalho era analisar cinco módulos de rádio que realizam a comunicação entre o *rover* e o ponto de onde os dados da estação base são enviados. Dos cinco módulos analisados apenas o Ubiquiti Rocket M5 cumpriu todos os critérios pré-definidos que eram taxa de transferência de dados acima de 2,5 kbps, confiabilidade e estabilidade na comunicação e complexidade de implementação. Seu fabricante descreve no *datasheet* que a comunicação pode chegar a taxas de até 150 Mbps, podendo comunicar rádios em longas distâncias e sua implementação se mostrou simples dado que todos os *datasheets* do produto e da interface *web* estavam muito bem explicados.

Com todos os resultados obtidos foi possível comprovar que o uso do módulo de rádio Ubiquiti Rocket M5 é adequado para a aplicação proposta de baixa latência, alta confiabilidade e estabilidade.

Os objetivos específicos propunham utilizar parâmetros como latência, *jitter*, potência de sinal e ruído para verificar a qualidade da comunicação. Como já esclarecido no capítulo anterior, a latência dos pontos colhidos que atingiram o RTK Fix estava abaixo dos 2 segundos exigidos pelo RTK para que se obtenha uma boa solução RTK e o *jitter* dos pontos foi nulo, pois era pequeno o suficiente para não ser detectado. O ruído, tanto do transmissor quanto do receptor, apresentou-se em valores considerados bons para ambientes urbanos e juntamente com os valores de potência de sinal pode-se constatar que a relação sinal-ruído manteve-se na faixa de 20 a 50 dB, validando o rádio para ambos parâmetros.

A legislação brasileira feita pela ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) define que VANTs com o peso de até 25 kg (incluindo bateria ou combustível) devem sobrevoar no máximo a uma altura de 120 m do solo e na horizontal onde o piloto possa ver a aeronave (que é a uma distância de aproximadamente 1 km na área rural). Com base nisso, o módulo de rádio pode ser validado, pois como o Drone EtherCopter X6 4S segue essas normas da ANAC, seus voos não exigirão uma comunicação entre *ground station* e *rover* em que a distância ultrapasse 1 km. E os testes foram realizados com uma distância de até 750 m sem que houvesse perda significativa de sinal na conexão.

Como trabalhos futuros, pretende-se transmitir o vídeo da câmera fpv (do inglês *First person view*) da Raspberry Pi para que o piloto e o topógrafo possam acompanhar o voo do drone através dos rádios, pois se houver uma emergência o piloto pode trazer o drone de

volta em segurança. Como a transferência de dados da estação base para o *rover* exige uma taxa de aproximadamente 2,5 kbps e nos testes obteve-se uma taxa de 4,875 Mbps, o que é suficiente para transferir os dados para as correções que o RTK exige e o vídeo em HD que demanda uma taxa de aproximadamente 2 Mbps.

REFERÊNCIAS

5 Minute Modules - NTRIP, RTK and Base Stations. 2016.

<<https://www.youtube.com/watch?v=R0Hry5kR1jYt>>.

BLEWITT, G. Basics of the gps technique: observation equations. *Geodetic applications of GPS*, Nordic Geodetic Commission Sweden, p. 10–54, 1997.

BROUMANDAN, A.; LIN, T. Performance of gnss time of arrival estimation techniques in multipath environments. In: *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 632–643.

CERF, V.; KAHN, R. A protocol for packet network intercommunication. *IEEE Transactions on communications*, IEEE, v. 22, n. 5, p. 637–648, 1974.

CHAPTER 1 - GNSS Overview. NovAtel, 2019.

<<https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-1-gnss-overview/>>.

ENCARNACION, I. V.; TIGLAO, N. M. C. Rtklib-based gps localization for multipath mitigation in its applications. In: IEEE. *Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2016 Eighth International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 1077–1082.

GNSS. 2019. <<https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-1-gnss-overview/section-1/>>.

GNSS - PPP. 2018. <<https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-5-resolving-errors/precise-point-positioning-ppp/>>.

HIERTZ, G. R. et al. The ieee 802.11 universe. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 48, n. 1, p. 62–70, 2010.

IBM - LAN. 2001. <<https://www.ibm.com/developerworks/library/l-lan/index.html>>.

JITTER. 2004.

<<https://web.archive.org/web/20120207103425/http://documents.exfo.com/app/ang.pdf>>.

LATÊNCIA e Jitter. 2004.

<https://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo_dispersao_jitter_latencia.php>.

LORA Alliance. 2015. <<https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>>.

MAPS. 2019. <<https://www.google.com.br/maps>>.

MEDINA, I. *Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS / IBGE*. 2018. <<https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?t=sobre>>.

MIKROKOPTER. 2014.

<<http://www.mikrokopter.de/en/products/mk6s12e/flightsystems>>.

NOVATEL, N. *Chapter 1 - GNSS Overview*. 2019.

<<https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-1-gnss-overview/>>.

PROTOCOLO TCP. 2015.

<https://www.inf.ufes.br/zegonc/material/Redes_de_Computadores/O%20Protocolo%20TCP>.

PROTOCOLOS de comunicações. 2019.

<<http://www.criarweb.com/artigos/533.php>>.

RTK/NTRIP. 2018. <<https://blog.cpetecnologia.com.br/voce-sabe-como-funciona-o-sistema-rtk-descubra-agora-mesmo/>>.

SBAS. 2019. <<https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-5-resolving-errors/satellite-based-augmentation-systems/>>.

SEMTECH. 2019. <<https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>>.

SOFTWARE RTK para Drone. Novarum Sky, Sep 2018.

<<http://pt.novarumsky.com/index.php/portfolio/software-rtk-para-drone>>.

SÜZER, A. E.; OKTAL, H. Prn code correlation in gps receiver. In: IEEE. *Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2017 8th International Conference on*. [S.l.], 2017. p. 189–193.

UBIQUITI Networks - Rocket® M. Ubiquiti Networks, 2019.

<<https://www.ubnt.com/airmax/rocketm/>>.

ANEXO A – Conceitos básicos

A.1 LATÊNCIA

A latência, que também pode ser chamada de atraso, é o tempo em que um pacote de dados leva entre sua origem e seu destino . Ela pode ser entendida como a somatório dos atrasos impostos pela rede e pelos equipamentos utilizados na comunicação. Do ponto de vista da aplicação, a latência resulta em um tempo de resposta (tempo de entrega da informação, ou pacotes) para a aplicação (LATÊNCIA... , 2004).

A.2 JITTER

As comunicações de hoje são digitais, portanto, as informações são transportadas como uns e zeros e o tráfego na rede está aumentando dado que cada vez mais informações devem ser transportadas em velocidades cada vez maiores, o que faz com que a sincronização do tráfego nas redes seja bastante importante (JITTER, 2004).

A confiabilidade das telecomunicações é baseada nos sinais de dados que estão sendo sincronizados e cronometrados usando o mesmo relógio em todos os lugares da rede. A estabilidade do relógio é caracterizada por dois parâmetros: *jitter* e *wander*. *Jitter* refere-se às variações de fase rápidas e *wander* para variações de fase mais lentas. As variações de fase com um conteúdo de frequência acima de 10 Hz são consideradas *jitter*, enquanto aquelas com uma frequência abaixo de 10 Hz são referidas como *wander* (JITTER, 2004).

O *jitter* pode ser entendido como a variação no tempo e na sequência de entrega das informações (ex.: pacotes) devido à variação na latência da rede.

Telemetria é uma coleta e envio de dados de um dispositivo para outro de maneira remota. Trata-se de uma comunicação que é feita mais comumente sem fio (*wireless*) através de sinais de rádio. Esta é a forma usada para comunicar o VANT e a estação base.

A.3 LAN

Uma LAN (do inglês *Local Area Network*) é uma rede de comunicações que interconecta vários dispositivos e fornece um meio de troca de informações entre esses dispositivos. Seu tamanho e alcance são geralmente pequenos, abrangendo um único edifício ou grupo de edifícios. Em uma rede local, modems e linhas telefônicas não são necessários, e

os computadores devem estar próximos o suficiente para que um cabo de rede seja conectado entre eles entre eles (IBM..., 2001).

A.4 PROTOCOLOS

Um protocolo de comunicações é um conjunto de normas que estão obrigadas a cumprir todas as máquinas e programas que intervêm em uma comunicação de dados entre computadores sem os quais, a comunicação seria caótica e, portanto impossível (PROTOCOLOS..., 2019).

O Protocolo de transmissão de dados é o mais importante para este trabalho, sendo uns dos principais protocolos sem fio. Os tipos de protocolo usados neste trabalho são descritos abaixo.

A.5 SIMULADOR UBIQUITI

O simulador *online* da Ubiquiti pode ser acessado em:
<https://airlink.ui.com/#/ptp>)

APÊNDICE A – Apêndice


```

1  %GRAFICO DE DISTNCIA VERSUS LATNCIA/AGE
2
3  x=[411  509  532  626  691  744];
4  y=[0.8  0.8  0.8  0.8  100  0.8];
5  plot(x,y,'rh—')
6  title ('Latncia em fun da distancia ')
7
8  xlabel ('Distncia em m')
9
10 ylabel ('Latncia ')

1  %GRAFICO DE DISTNCIA VERSUS RUDO NO TX
2
3  x=[411  509  532  626  691  744];
4  y=[-104 -104 -104 -105 -104 -103];
5  plot(x,y,'b')
6  title ('Rudo de cho no TX em fun da distancia '
7        )
8  xlabel ('Distncia em m')
9
10 ylabel ('Rudo em dBm')

1  x=[411  509  532  626  691  744];
2  y=[-51.68 -53.55 -53.95 -55.36 -56.22 -56.87];
3
4  plot(x,y,'rd—')
5  title ('Intensidade do sinal em fun da distancia '
6        )
7  xlabel ('Distncia em m')
8
9  ylabel ('Intensidade do sinal em dBm')

1  %GRAFICO DE DISTNCIA VERSUS Rudo NO RX
2
3  x=[411  509  532  626  691  744];
4  y=[-99 -98 -99 -97 -99 -96];
5  plot(x,y,'b')
6  title ('Rudo de cho no RX em fun da distancia '
7        )

```

```

8 xlabel ('Distncia em m')
9
10 ylabel ('Potncia em dBm')

1 %GRAFICO DE DISTNCIA VERSUS INTENSIDADE DO SINAL
  NA GROUND
2
3 %Signal Strength (Available in Station mode only.)
  Displays the received wireless signal level (
  client-side).
4 %The represented value coincides with the graphical
  bar.
5 %Use the antenna alignment tool to adjust the
  device antenna to get a better link with the
  wireless device. The
6 %antenna of the wireless client has to be adjusted
  to get
7 %the maximum signal strength. Signal Strength is
  measured
8 %in dBm (the decibels referenced to 1 milliwatt).
  The conversion is defined as  $\text{dBm} = 10 \log_{10} (P / \text{mW})$ 
  . So, 0 dBm
9 %would be 1 mW and -72 dBm would be 0.0000006 mW. A
  signal strength of -80 dBm or better (-50 to
  -70 dBm) is
10 %recommended for stable links
11 x=[411 509 532 626 691 744];
12 y=[-60 -61 -66 -62 -66 -83];
13
14 plot(x,y,'rd-')
15 title ('Intensidade do sinal em fun da distncia
  ')
16
17 xlabel ('Distncia em m')
18
19 ylabel ('Intensidade do sinal em dBm')

```